

蚯蚓运动特征仿生筛筛上玉米脱出物运动特性研究

王立军 于泳涛 张 帅 宋良来 冯 鑫

(东北农业大学工程学院, 哈尔滨 150030)

摘要: 为探究基于蚯蚓运动特征的仿生筛上玉米脱出物的运动特性,利用 API 实现了仿生筛在 EDEM 中的非简谐运动(两移动一转动),并采用 CFD-DEM 耦合方法对玉米脱出物在气流和仿生筛共同作用下的筛上运动进行了数值模拟。通过分析玉米脱出物的筛分过程,明晰了仿生筛对筛上玉米脱出物的运移机理。探究了玉米脱出物在仿生筛上不同区域的水平运移和竖直分层。数值模拟结果表明:玉米籽粒、芯和茎秆在仿生筛上的平均水平速度分别为 0.63、1.60、2.51 m/s,有利于籽粒和杂余沿筛面水平分离和分散;玉米脱出物在筛体前部的平均水平速度最大,为 1.71 m/s,表明仿生筛能够将筛体前部的玉米脱出物快速向后运移以减少进料端堆积;随着玉米脱出物由筛体中部运动到筛体尾部,玉米籽粒平均竖直位移降低 20.61 mm,而芯和茎秆平均竖直位移却分别增大 9.84 mm 和 5.70 mm,籽粒和杂余在竖直方向上的分层明显;通过高速摄像分析了玉米脱出物在仿生筛上的运动状态,并提取了玉米脱出物在筛体前、中部区域的平均水平速度,其变化规律与数值模拟结果基本一致,验证了仿生筛对筛上玉米脱出物的运移机理。当仿生筛清选装置入口气流速度为 12.8 m/s、气流方向角为 25°、筛面最大下凹深度为 50 mm、凸轮转速为 120 r/min 时,仿生筛清选装置筛分后的籽粒损失率均值为 0.61%,籽粒含杂率均值为 1.94%,均满足国家标准要求。

关键词: 谷物清选筛; 仿生; 玉米脱出物; CFD-DEM; 运动特性

中图分类号: S225.5⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2022)03-0158-09

OSID:



Motion Characteristics of Maize Mixture on Bionic Screen
Based on Earthworm Motion Characteristics

WANG Lijun YU Yongtao ZHANG Shuai SONG Lianglai FENG Xin

(College of Engineering, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China)

Abstract: To explore the motion characteristics of maize mixture on the bionic screen designed based on the earthworm motion characteristics, the non-harmonic motion of the bionic screen in EDEM was realized by using API, and computational fluid dynamics and discrete element method (CFD-DEM) were coupled to simulate the motion of maize mixture under the combined action of airflow and bionic screen. The mechanism of maize mixture migrated on bionic screen was clarified by analyzing their screening process. The horizontal migration and vertical stratification of maize mixture in different areas of bionic screen were studied. The numerical simulation results showed that the average horizontal velocity of maize grain, cob, and stalk on the bionic screen was 0.63 m/s, 1.60 m/s and 2.51 m/s, respectively, which was conducive to the horizontal separation and dispersion of maize grains and impurities along the screen surface. The average horizontal velocity of the maize mixture in the front of the screen was the fastest, which was 1.71 m/s, indicating that the bionic screen could make the maize mixture migrate backward rapidly in the front of the screen to reduce the accumulation at the feeding end. When the maize mixture moved from the middle to the tail of the screen, the average vertical displacement of maize grain was decreased from 40.20 mm to 19.59 mm, and the average vertical displacements of the cob and stalk were increased from 54.47 mm and 71.31 mm to 64.31 mm and 77.01 mm, respectively. From bottom to top, the maize mixture on the screen was maize grain, cob, and stalk, respectively. With the maize mixture migrating backward, the vertical stratification of maize grain and impurity became more apparent. The motion state of the maize mixture on the bionic screen and their horizontal velocity changed were analyzed

收稿日期: 2021-03-22 修回日期: 2021-04-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(52075091)和黑龙江省教育厅省属高校科技成果转化支持计划项目(TSTAU-R202003)

作者简介: 王立军(1978—),女,教授,博士生导师,主要从事收获机械研究,E-mail: wljszf@163.com

by the high-speed camera, which was basically consistent with numerical simulation results. The mechanism of maize mixture migrated on bionic screen was verified. When the inlet airflow velocity of cleaning device of the bionic screen was 12.8 m/s, and its airflow direction angle was 25°. The maximum concave depth of the screen surface was 50 mm, and the rotational speed of the cams were 120 r/min. The loss percentage and impurity percentage of maize grain of the bionic screen was 0.61% and 1.94%, respectively, which met the requirements of the national standard. The research result can provide a reference for parameter optimization and the exploration of flexible screening mechanisms of the maize bionic screen based on the earthworm motion characteristics.

Key words: screen of corn cleaning; bionic; maize mixture; CFD – DEM; motion characteristics

0 引言

颗粒在筛面上的运动直接影响筛上颗粒的分散、分层和透筛^[1]。经脱粒装置脱粒后分离出的脱出混合物进入风筛式清选装置后的运动是一种复杂的气固两相流动,在气流-颗粒、颗粒-颗粒、颗粒-筛面间存在着复杂的动量交换^[2]。玉米脱出物(特别是籽粒)在筛面的运动直接影响清选装置的筛分性能^[3-4]。

国内外学者主要通过理论推导、数值模拟和样机试验对颗粒的运动进行深入研究。李耀明等^[5]基于混沌理论建立了颗粒与简谐振动筛面之间的碰撞运动模型,获得了清选筛面上物料的非线性运动规律。刘初升等^[6]利用振动筛与颗粒之间的运动学模型,得出了颗粒运动的周期性条件,并利用 Poincaré 映射方法推导出颗粒运动对周期运动的扰动方程。原建博等^[7]采用 CFD – DEM 耦合的方法分析了内圆筒筛入口风速和安装导流板圈数对混合物各成分运动规律及筛分特性的影响。YIN 等^[8]基于离散单元法对椭圆振动筛上颗粒流的筛分过程进行了数值模拟,研究了筛板上颗粒的运动特性及轨迹等对筛分效率和输送速度的影响。JIANG 等^[9]通过动态图像分析系统追踪了变幅筛筛上颗粒的分层和运移情况,并分析了不同参数对筛分效率的影响。王立军等^[10]利用高速摄像机对玉米颗粒在 3 种不同运动形式的振动平板上的运动进行了跟踪,获得了筛面不同运动形式对颗粒分散度和筛分效率的影响。

通过仿生设计可有效提升农业机械的作业性能,解决农业机械领域中的难题^[11]。在清选筛的仿生研究方面,MA 等^[12]依据仿生非光滑表面的减粘降阻功效,设计了仿生非光滑振动筛,揭示了筛面减粘脱附机理。程超等^[13]通过表面改性的方式,设计了具有抗粘减阻性能的振动筛,降低了水稻脱出物与筛面的摩擦因数和界面粘附力。

笔者前期以蚯蚓为仿生原型,融合蚯蚓运动特

征与清选筛作业原理,设计了一种基于蚯蚓运动特征的仿生筛^[14],使筛体前部的玉米脱出物能够快速向后运移,可减少大喂入量下清选筛进料端玉米脱出物堆积。本文在此基础上,采用 CFD – DEM 耦合的方法对上述仿生筛清选装置内气固两相流进行数值模拟,探究此仿生筛筛上玉米脱出物的运动特性,为后续仿生筛的参数优化及其透筛机理的探究奠定基础。

1 仿生筛结构与工作原理

1.1 基于蚯蚓运动特征的仿生筛结构

基于蚯蚓运动特征的仿生筛结构如图 1 所示,其主要由机架、凸轮驱动机构和筛片等构成。在机架的前、后两侧相互对称地固装两侧板,驱动轴通过轴承座固定在侧板上,驱动轴的前、后两端分别安装凸轮驱动机构,凸轮驱动机构通过与其铰接的连接轴带动筛片运动,筛面两侧安装有挡板。此仿生筛共由 16 片独立筛片组成。

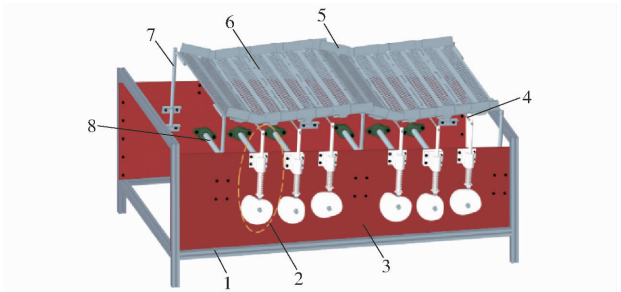


图 1 仿生筛结构示意图

Fig.1 Structure diagram of bionic screen

1. 机架 2. 凸轮驱动机构 3. 侧板 4. 连接轴 5. 筛上挡板
6. 筛片 7. 支撑杆 8. 驱动轴

凸轮机构驱动筛片的方式如图 2 所示,以筛片 2 和筛片 3 为例,每组凸轮驱动机构由凸轮、弹簧、推杆滑道、带滚子推杆组成。凸轮与带滚子推杆下方的滚子紧密接触,带滚子推杆插装在与侧板固接的推杆滑道中,压力弹簧套装在带滚子推杆上,位于滚子与推杆滑道之间。带滚子推杆上方与连接轴铰接,连接轴穿过筛片上的轴孔铰接相邻的筛片 2 和筛片 3。驱动轴带动凸轮旋转,凸轮推动带滚子推

杆沿推杆滑道上下往复运动,带动相邻筛片随着凸轮的转动上下运动。

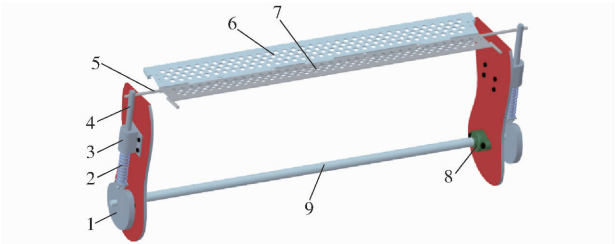


图2 筛片驱动机构

Fig. 2 Driving mechanism of screen plates

1. 凸轮 2. 弹簧 3. 推杆滑道 4. 带滚子推杆 5. 连接轴 6. 筛片 7. 筛片 8. 轴承座 9. 驱动轴

1.2 工作原理

仿生筛中筛片1~8与筛片9~16是完全相同的2组筛片,其运动完全相同,因此仅分析第1组筛片1~8的运动对筛上玉米脱出物的运移。蚯蚓运动过程中下表面波浪形几何体表下凹位置不同,仿生筛筛面在运动过程中会形成如图3所示的4种姿态。通过凸轮驱动机构之间的相互配合控制筛面完成姿态0到姿态3的连续转换。姿态0为筛面的初始状态,当筛面处于姿态1时,筛体前部筛面下凹并达到最低点,筛面变为V型。随着筛面由姿态1运动到姿态2,V型筛面的最低点逐渐运动到筛体中部。当筛面运动到姿态3时,V型筛面的最低点由筛体中部运动到筛体后部,如此往复循环,实现筛面的周期运动。

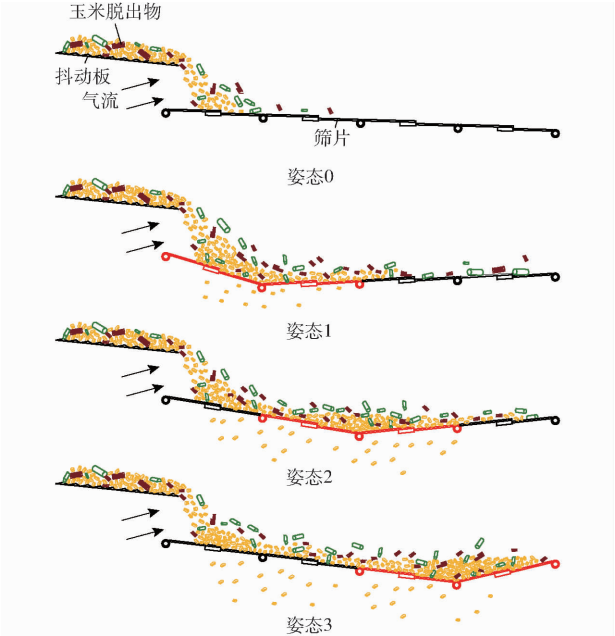


图3 仿生筛向后运移玉米脱出物原理图

Fig. 3 Diagram of principle that maize mixture was migrated backward by bionic screen

作业时,仿生筛通过风机产生的气流和筛面的运动协同完成玉米籽粒与杂余的分离清选。风机安

装在仿生筛的前端,产生的气流可使玉米脱出物在从抖动板下落的过程中初步分散。玉米脱出物被喂入到仿生筛前端,随后向V型筛面最低点处聚集,并随着V型筛面逐渐向后运移。同时,仿生筛由下凹弯曲到展平的过程中,将筛面上的玉米脱出物抛起并使之变得松散,杂余与籽粒逐渐分层、分散。未完成清选的玉米脱出物被抛送到筛片9~16,重复上述运动。

2 仿生筛清选装置内气固两相流数值模拟

2.1 数值模拟流程

仿生筛的运动为非简谐运动(两移动一转动),而EDEM现有模块无法对非简谐运动筛面直接添加运动^[15]。本文首先通过Pro/E建立仿生筛三维模型;然后将简化后的模型导入ADAMS,并设置材料属性、约束、接触力、驱动以及仿真参数,对仿生筛进行动力学仿真;之后通过后处理模块提取各筛片的运动曲线及相应数据,并利用Matlab的数据处理功能,对数据点进行拟合,得到各筛片的运动方程;最后通过应用程序编程接口(Application programming interface, API)将仿生筛各筛片的非简谐运动添加到EDEM中。

为了给仿生筛清选装置内添加气流场,需要建立仿生筛清选装置的简化模型并对其进行网格划分。以6行玉米联合收获机清选装置为参考对仿生筛清选装置进行建模,清选装置长度为1779 mm,高度为500 mm;鉴于仿生筛筛面没有横向位移,且其结构在宽度方向上完全对称,筛面宽度对筛上颗粒运动规律没有影响,同时,考虑到计算机处理能力,清选装置宽度选择125 mm^[16];其气流入风口高度为380 mm,杂余出口高度为280 mm;筛体为圆孔筛,圆孔直径为15 mm,横、纵间距分别为13.75 mm和28 mm。筛面长度为1500 mm,宽度为120 mm,其整体倾角为-3.5°。阶梯抖动板尾部与筛体前部垂直距离为80 mm,其整体倾角为-5°,仿生筛清选装置网格模型如图4所示。

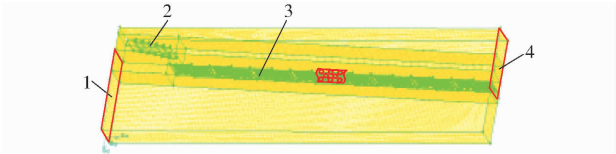


图4 仿生筛清选装置网格模型

Fig. 4 Mesh model of cleaning device of bionic screen

1. 气流入风口 2. 抖动板 3. 筛体 4. 杂余出口

最后,将Fluent与EDEM进行耦合,实现仿生筛清选装置内气固两相流的数值模拟,其仿真流程如图5所示。

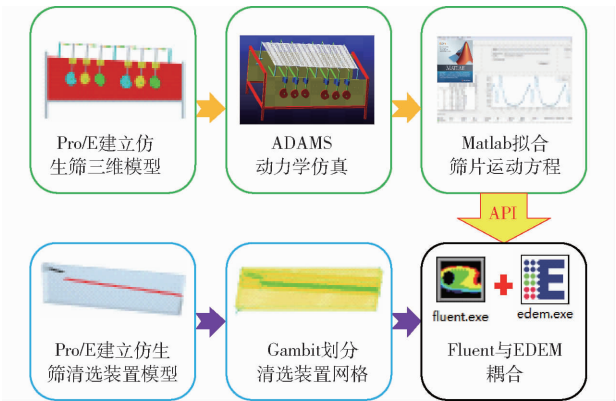


图 5 仿生筛清洗装置内气固两相流数值模拟流程

Fig.5 Numerical simulation process of gas-solid two-phase flow in cleaning device of bionic screen

2.2 玉米脱出物成分及其颗粒模型

玉米脱出物的实际组成及各成分的质量分数如图 6 所示^[17]。其中轻质杂余(玉米苞叶、玉米须等)仅占 0.4%,因其成分复杂且其对数值模拟结果准确性的影响可忽略^[18],因此不建立其三维仿真模型。

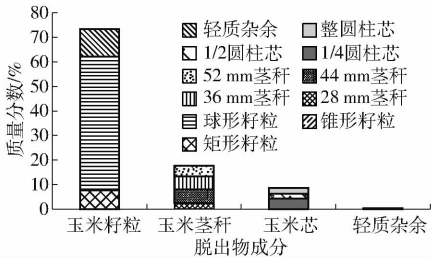


图 6 玉米脱出物各成分质量分数

Fig.6 Percentage of each component in maize mixture

对玉米脱出物其余各成分进行仿真颗粒的三维建模,为尽可能减小其建模形状对数值模拟结果的影响^[19],通过三维激光扫描试验台,对东北地区主要玉米品种之一的先达 205 玉米脱出物进行扫描建模,将扫描后的模型图导入 EDEM 中,并以此图所示轮廓为依据对其进行小球填充。图 7a 为锥形玉米籽粒的小球填充过程,填充完成后的玉米脱出物仿真模型如图 7 所示。

2.3 仿真参数设置

在 Fluent 中选择标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,求解器类型设为压力基非稳态。在 EDEM 中选用 Hertz - Mindlin (no-slip) 模型,EDEM 中时间步长为 Rayleigh 时间步长的 20%,Fluent 时间步长为 EDEM 时间步长的 100 倍。基于课题组的前期研究成果^[20-21],在玉米籽粒、茎秆和芯的含水率分别为 27.91%、37.62% 和 57.09% 的情况下,玉米脱出物各成分的力学特性参数以及相互间接触属性如表 1、2 所示。

2.4 颗粒工厂设置

现有 6 行玉米联合收获机常规作业速度下玉米

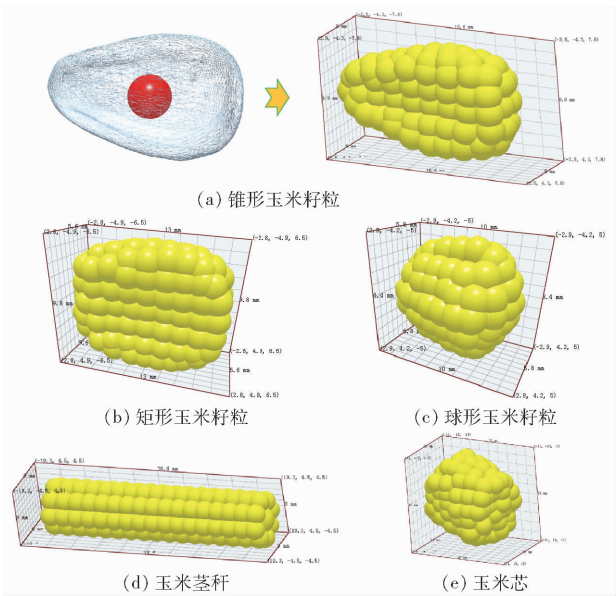


图 7 玉米脱出物仿真模型

Fig.7 Simulation models of maize mixture

表 1 材料力学特性参数

Tab.1 Parameters of mechanical properties of materials

材料	密度/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$)	剪切模量/MPa	泊松比
籽粒	1 190	127	0.40
茎秆	150	100	0.42
芯	650	109	0.45
筛面(钢)	7 800	70 000	0.30

表 2 材料相互间接触属性参数

Tab.2 Parameters of interaction properties of materials

材料	碰撞恢复系数	滚动摩擦因数	静摩擦因数
籽粒-籽粒	0.44	0.06	0.50
籽粒-茎秆	0.35	0.01	0.32
籽粒-芯	0.28	0.01	0.73
籽粒-筛面(钢)	0.61	0.03	0.53
茎秆-茎秆	0.26	0.01	0.32
茎秆-芯	0.29	0.01	0.47
茎秆-筛面(钢)	0.43	0.01	0.45
芯-芯	0.27	0.01	0.97
芯-筛面(钢)	0.39	0.01	0.43

脱出物的平均喂入量为 5 kg/s,设置颗粒工厂时,将玉米脱出物喂入量按筛面宽度等比例缩减为 0.543 3 kg/s,并持续喂入 3 s,玉米脱出物各成分的具体喂入量如表 3 所示。

2.5 仿真试验设计

实际作业时玉米联合收获机风机出口气流速度为 9.6 ~ 16.0 m/s、出风口角度为 20° ~ 30°,仿真时,清洗装置入口气流的速度和方向角均选取各自范围的中间值 12.8 m/s 和 25°。在此条件下,探究仿生筛在最大下凹深度 50 mm、凸轮转速 120 r/min 时筛上玉米脱出物的水平运移和竖直分层规律。

表 3 玉米脱出物各成分喂入量

Tab.3 Feeding mass of different components of maize mixture

成分	类别	质量/kg	总质量/kg
玉米籽粒	锥形	0.893 5	1.199 5
	球形	0.181 6	
	矩形	0.124 4	
玉米茎秆	28 mm 长圆柱	0.039 3	0.288 0
	36 mm 长圆柱	0.093 3	
	44 mm 长圆柱	0.086 7	
	52 mm 长圆柱	0.068 7	
玉米芯	1/4 圆柱	0.072 0	0.142 5
	1/2 圆柱	0.029 5	
	整个圆柱	0.041 0	
总计			1.630 0

3 模拟结果与分析

3.1 仿生筛筛分过程分析

当玉米脱出物持续喂入 3 s 时,1.0 s 以后筛面上形成连续且稳定的物料流,如图 8a 所示,符合实际作业过程中物料的连续筛分状态。在此状态下,分析仿生筛在一个运动周期(1.5~2.0 s)内的筛分过程。为避免凸轮发生自锁,凸轮各行程所对应的运动角不同,因此筛面各姿态之间的间隔时间不同。图中黄色物料为玉米籽粒,绿色物料为玉米茎秆,红色物料为玉米芯。

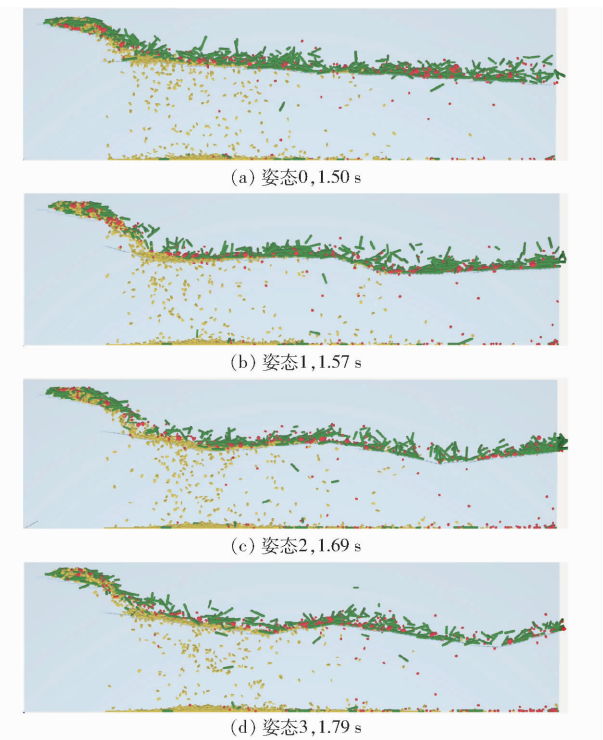


图 8 玉米脱出物在仿生筛不同姿态时的筛分状态
Fig.8 Screening states of maize mixture in different postures of bionic screen

在筛面由姿态 0 向姿态 1 转换的过程中,筛体前部筛面迅速下凹,玉米脱出物随着 V 型筛面的下坡面迅速向后滑移,以减少其在进料端的堆积,如图 8b 所示。在筛面由姿态 1 向姿态 2 转换的过程中,V 型筛面的最低点逐渐向后移动,将玉米脱出物向后运移,如图 8c 所示。随着筛面由姿态 2 运动到姿态 3,玉米脱出物沿着 V 型筛面较长的下坡面向后滑移,如图 8d 所示。当玉米脱出物运动到 V 型筛面的上坡面时,上坡面对快速向后运移的玉米脱出物起到一定的阻挡作用,避免大量玉米籽粒因速度过快而导致其经过筛孔时“过而不透”,从而提高玉米籽粒透筛的概率。在筛面由姿态 3 向姿态 0 转换的过程中,筛面逐渐向上运动直至恢复初始状态,在此过程中 V 型筛面的最低点不再继续向后运动,此时玉米籽粒大量透筛。同时,筛面上的玉米脱出物被抛起并变得松散,特别是当玉米脱出物沿第 1 组筛片 1~8 所形成的 V 型筛面的上坡面向第 2 组筛片 9~16 所形成的 V 型筛面的下坡面过渡时会进行第 2 次抛扬(风机在进料端对玉米脱出物进行第 1 次抛扬),因玉米脱出物各成分在物理和力学特性上存在差异,茎秆和芯被抛起的距离以及高度大于籽粒,进而实现玉米脱出物的进一步分层、分散。如此往复,直至完成玉米籽粒和杂余的清选。

3.2 玉米脱出物水平运移分析

为探究仿生筛筛上玉米脱出物向后运移的规律,将筛面沿其长度方向从前往后依次等距划分为 4 个区域,分别命名为区域 I、II、III、IV,如图 9 所示。

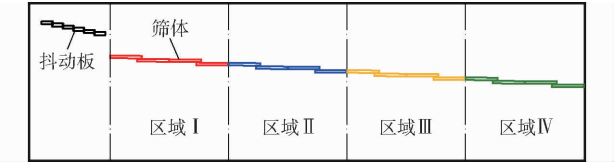


图 9 仿生筛筛面区域划分
Fig.9 Division of bionic screen

提取 1.5~2.5 s 时间段内玉米籽粒、茎秆和芯在仿生筛区域 I~IV 水平方向的平均速度,如图 10 所示。

由图 10 可知,在区域 I、II、III、IV,玉米籽粒的平均水平速度最低,为 0.63 m/s,芯次之,为 1.60 m/s,而茎秆最大,为 2.51 m/s。相比芯和茎秆,籽粒的密度最大、迎风面积最小^[22],因此,其受气流影响最小,导致其平均水平速度低于芯和茎秆,这有利于玉米籽粒与杂余(秸秆和芯)沿筛面水平方向的分离和分散。

玉米籽粒的平均水平速度在区域 I 最大,为 1.00 m/s,在区域 IV 最小,为 0.43 m/s,其沿仿生筛

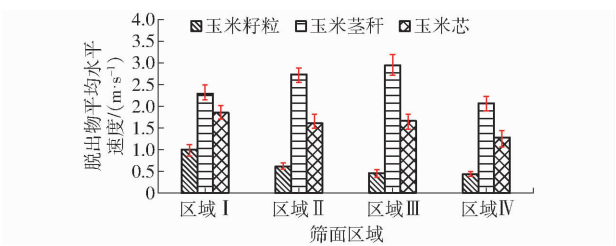


图 10 玉米脱出物在不同区域的平均水平速度
Fig. 10 Average horizontal velocity of maize mixture in different areas

筛面从前往后逐渐降低。籽粒在区域 I 时平均水平速度最大,使其在筛体前部能够快速向后运移。从区域 II 开始籽粒平均水平速度逐渐降低,增加了籽粒在筛上的停留时间,提高了籽粒透筛概率。

茎秆在区域 I、II、III、IV 的平均水平速度分别为 2.29、2.73、2.94、2.07 m/s,其变化规律为先增大后减小。当茎秆沿区域 II 内 V 型筛面的上坡面向区域 III 内 V 型筛面的下坡面过渡时,气流对其进行二次抛扬,使其水平速度达到最大值 2.94 m/s。

芯的平均水平速度在区域 I 最大,为 1.85 m/s,使其在筛体前部能够快速向后运移。之后因为气流对芯的携带作用减弱,其平均水平速度从区域 II 开始降低,但其在区域 II、III、IV 的平均水平速度比同区域籽粒分别大 1.00、1.20、0.85 m/s,芯在筛上的停留时间远小于籽粒。

综合比较玉米脱出物的水平速度可知,玉米脱出物在区域 I、II、III、IV 的平均水平速度分别为 1.71、1.65、1.69、1.26 m/s。区域 I 筛面处于下坡面,且其靠近风机出口,因此,玉米脱出物的平均水平速度最大,有利于仿生筛将筛体前部的玉米脱出物快速向后运移,减少筛体进料端的堆积。

3.3 玉米脱出物竖直分层分析

为探究仿生筛筛上玉米脱出物竖直分层的规律,提取 1.5~2.5 s 时间段内玉米籽粒、茎秆和芯在仿生筛区域 I~IV 竖直方向的平均位移,如图 11 所示。

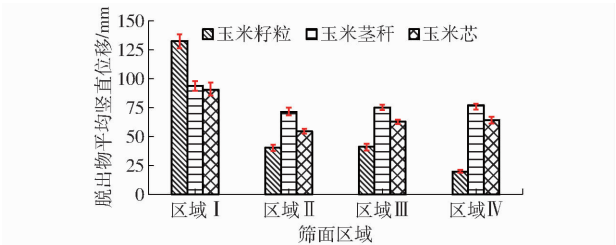


图 11 玉米脱出物在不同区域的平均竖直位移
Fig. 11 Average vertical displacement of maize mixture in different areas

区域 I 玉米籽粒的平均竖直位移最大,为 132.64 mm,分别比同区域茎秆和芯的平均竖直位

移大 38.94 mm 和 42.25 mm。但观察仿真过程可以发现,玉米脱出物在区域 I 无明显分层现象,主要是区域 I 靠近玉米脱出物进料端,玉米脱出物从抖动板下落的过程中被风机产生的气流吹散,导致其在区域 I 竖直方向上相互混杂。

区域 II 玉米籽粒、茎秆和芯的平均竖直位移分别为 40.20、71.31、54.47 mm,相比区域 I 分别降低 69.69%、23.90% 和 39.74%。原因是气流对区域 II 玉米脱出物的吹散作用减弱,同时玉米脱出物处于爬坡状态。此时,茎秆位于玉米脱出物的最上层,芯次之,籽粒处于最下层,籽粒和杂余在竖直方向上出现明显的分层现象。

区域 III 玉米籽粒、茎秆和芯的平均竖直位移相比区域 II 分别增加了 0.88、3.74、8.24 mm。主要是玉米脱出物由区域 II 向区域 III 过渡时发生二次抛扬,导致其竖直位移相比区域 II 出现小幅度的增大。杂余竖直位移的增大幅度大于籽粒,使籽粒和杂余在竖直方向上的分层愈加明显。

区域 IV 玉米籽粒的平均竖直位移仅为 19.59 mm,相比区域 I~III 出现明显的降低,究其原因主要是籽粒在区域 I~III 已经大量透筛,运动到区域 IV 时仅剩少量籽粒,因此籽粒的竖直位移明显降低。茎秆和芯的平均竖直位移则继续增大,分别增大到 77.01 mm 和 64.31 mm,此时茎秆和芯的数量较多且直接接触筛面,与筛面碰撞后的反弹高度较高,导致籽粒和杂余在筛体尾部的竖直分层效果最好。

4 台架验证试验

4.1 高速摄像试验

为验证仿生筛对筛上玉米脱出物的运移机理,通过电机驱动如图 12 所示的仿生筛清选装置,并进行高速摄像试验。

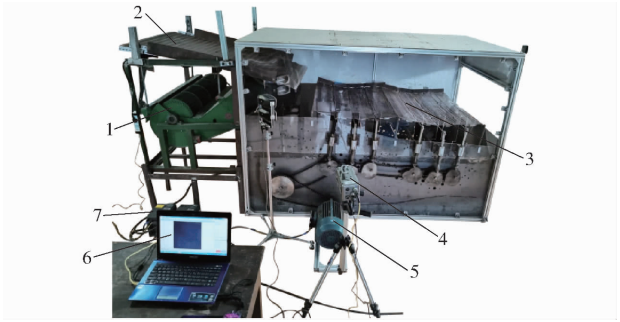


图 12 仿生筛清选装置
Fig. 12 Cleaning device of bionic screen
1. 风机 2. 抖动板 3. 仿生筛 4. 高速摄像机 5. 电机 6. 计算机 7. 变频器

通过风机变频器和气流方向角调节板,将清选

装置入口气流的速度和方向角分别设定为 12.8 m/s 和 25°。仿生筛最大下凹深度为 50 mm、凸轮转速为 120 r/min。试验玉米品种为先达 205,于 2020 年 10 月 1 日取自东北农业大学农学院试验田,玉米籽粒、茎秆和芯的含水率范围分别为 27.41% ~ 27.65%、37.22% ~ 38.01% 和 57.09% ~ 58.22%。试验参照 GB/T 21961—2008《玉米收获机械试验方法》进行,试验时将玉米脱出物各组成成分按比例均匀混合,并在 3 s 内连续喂入 15 kg,以保证其喂入量为 5 kg/s。

因所用 PCO. dimax 高速摄像机镜头视角范围有限,拍摄时无法涵盖整个筛面,因此以仿生筛的第 1 组筛片 1 ~ 8 为例进行验证。玉米脱出物在仿生筛一个运动周期 (1.5 ~ 2.0 s) 内的运动状态如图 13 所示。筛面在不同姿态时通过筛面下凹形成的 V 型筛面的最低点能够聚集筛上玉米脱出物,并在其最低点逐渐向后移动的过程中将筛体前部玉米脱出物向后运移以减少进料端玉米脱出物的堆积。

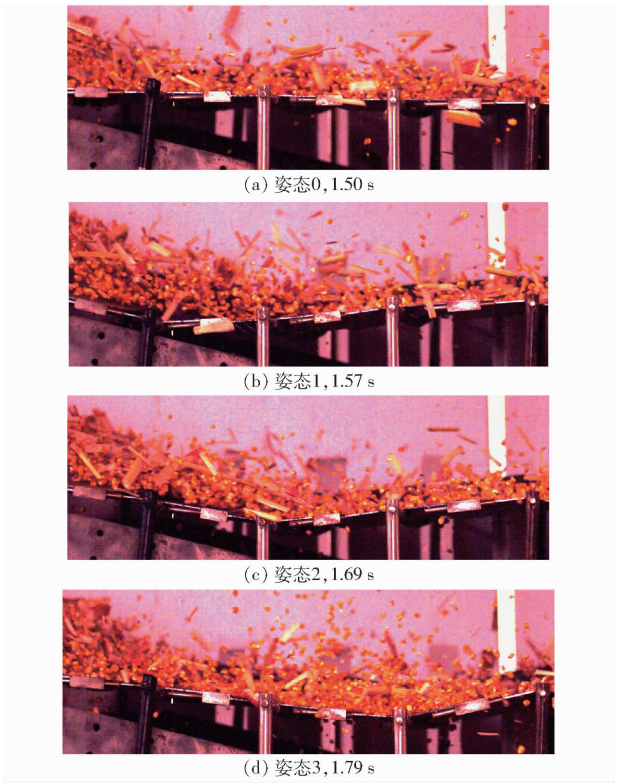


图 13 玉米脱出物在仿生筛不同姿态时的运动状态
Fig. 13 Motion states of maize mixture in different postures of bionic screen

为了能够在颗粒群中准确追踪目标颗粒,以 2 mm × 2 mm 的网格对高速摄像后的图像进行划分,如图 14 所示。

通过某时刻下目标颗粒所处网格位置对其进行定位,从而获得目标颗粒的准确坐标。高速摄像画面传输速度为 1 000 f/s,每间隔 20 f 提取一次目标

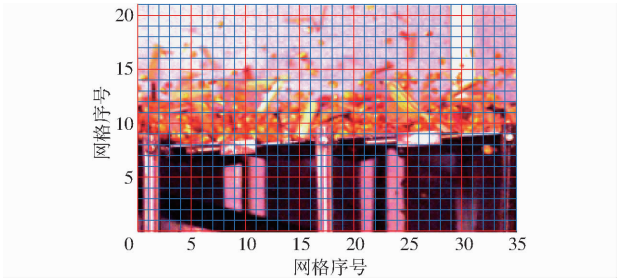


图 14 高速摄像图像网格划分
Fig. 14 Mesh generation of high speed camera image

颗粒的位置坐标,将该位移与 20 f 间隔时间 (0.02 s) 相比获得的平均速度作为该目标颗粒的瞬时速度。

分别提取 1.5 ~ 2.5 s 时间段内 20 个玉米籽粒、10 个茎秆和 10 个芯在区域 I、II 的平均水平速度,如图 15 所示。玉米籽粒和芯在区域 I 的平均水平速度比其在区域 II 分别高 0.43 m/s 和 0.14 m/s,而茎秆在区域 I 的平均水平速度比在区域 II 低 0.45 m/s。在区域 I、II,玉米籽粒的水平速度最低,芯次之,而茎秆最大,均值分别为 0.81、1.82、2.44 m/s,玉米脱出物在区域 I、II 的水平速度变化规律与数值模拟结果基本一致。通过分析玉米脱出物在仿生筛筛上的运动状态以及其在区域 I、II 的水平速度变化规律,验证了仿生筛对筛上玉米脱出物的运移机理。

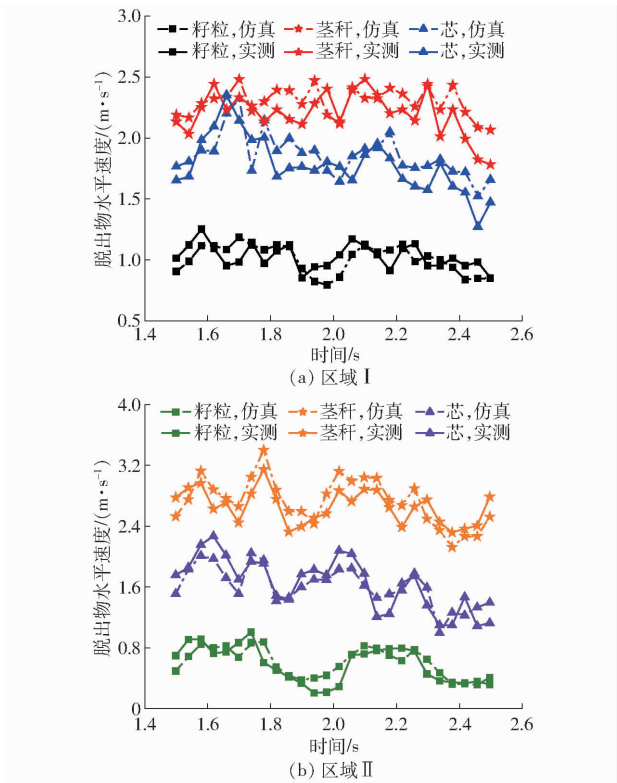


图 15 玉米脱出物在区域 I、II 的平均水平速度变化曲线
Fig. 15 Variation curves of average horizontal velocity of maize mixture in I and II areas

玉米脱出物在区域 I、II 的平均水平速度试验

结果如表 4 所示。

表 4 玉米脱出物平均水平速度试验结果
Tab.4 Test results of average horizontal velocity of maize mixture

筛体 区域	玉米脱出物	实测值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	仿真值/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	相对误差/ %
I	籽粒	1.02	1.00	2.00
	茎秆	2.21	2.29	3.49
	芯	1.79	1.85	3.24
II	籽粒	0.59	0.61	3.28
	茎秆	2.66	2.73	2.56
	芯	1.65	1.61	2.48

在建立仿生筛清选装置模型时进行了一些简化、玉米脱出物仿真模型无法与实物完全相同以及玉米脱出物数量等比缩减等^[23],都可能造成数值模拟结果与实际试验结果存在一定的误差。但实测值与数值模拟结果的相对误差不超过 3.49%,误差在可接受范围内,证明了数值模拟的准确性。

4.2 仿生筛清选性能

对仿生筛清选装置筛分后的籽粒损失率和含杂率进行了计算,每组试验重复 5 次取平均值,试验结果如表 5 所示。仿生筛清选装置的籽粒损失率均值为 0.61%,籽粒含杂率均值为 1.94%,清选性能满足国家标椎要求^[24-25]。

5 结论

(1)玉米籽粒、芯和茎秆在仿生筛上的平均水平速度分别为 0.63、1.60、2.51 m/s,其水平运移速度的不同有利于籽粒和杂余沿筛面水平分离和分

表 5 台架清选性能试验结果
Tab.5 Test results of cleaning performance of bench

序号	籽粒损失率/%	籽粒含杂率/%
1	0.57	1.85
2	0.69	2.23
3	0.58	1.91
4	0.44	2.31
5	0.76	1.40
均值	0.61	1.94
标椎差	0.11	0.32

散。玉米脱出物在筛体前部的平均水平速度最大,为 1.71 m/s,使仿生筛能够将筛体前部的玉米脱出物快速向后运移以减少进料端堆积。

(2)当玉米脱出物由筛体中部运动到尾部时,玉米籽粒平均竖直位移由 40.20 mm 降低为 19.59 mm,芯和茎秆的平均竖直位移分别由 54.47 mm 和 71.31 mm 增大到 64.31 mm 和 77.01 mm。玉米籽粒位于筛上脱出物的最下层,芯位于中间层,茎秆则位于最上层,分层效果明显,且随着玉米脱出物逐渐向后运动,籽粒和杂余在竖直方向上的分层更加明显。

(3)通过高速摄像分析了玉米脱出物在仿生筛上的运动状态及其水平速度变化规律,其结果与数值模拟基本一致,验证了仿生筛对筛上玉米脱出物的运移机理。当仿生筛清选装置入口气流速度为 12.8 m/s、气流方向角为 25°、筛面最大下凹深度为 50 mm、凸轮转速为 120 r/min 时,仿生筛清选装置的籽粒损失率均值为 0.61%,籽粒含杂率均值为 1.94%,均满足国家标椎要求。

参 考 文 献

[1] 焦红光,赵跃民.筛面上颗粒运动的计算机仿真研究及试验验证[J].矿冶,2006,15(1):63-67.
JIAO Hongguang, ZHAO Yuemin. Computer emulation of particle motion on the screen plate and its validation by test[J]. Mining & Metallurgy, 2006, 15(1): 63-67. (in Chinese)

[2] 马征,李耀明,徐立章.农业工程领域颗粒运动研究综述[J].农业机械学报,2013,44(2):22-29.
MA Zheng, LI Yaoming, XU Lizhang. Summarize of particle movements research in agricultural engineering realm[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(2): 22-29. (in Chinese)

[3] 苏天生,韩增德,崔俊伟,等.谷物联合收割机清选装置研究现状及发展趋势[J].农机化研究,2016,38(2):6-11.
SU Tiansheng, HAN Zengde, CUI Junwei, et al. Research status and development trend of cleaning unit of cereal combine harvesters[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(2): 6-11. (in Chinese)

[4] 王立军,宋良来,冯鑫,等.谷物联合收获机筛分装置研究现状与发展分析[J].农业机械学报,2021,52(6):1-17.
WANG Lijun, SONG Lianglai, FENG Xin, et al. Research status and development analysis of screening devices of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(6): 1-17. (in Chinese)

[5] 李耀明,赵湛,陈进,等.风筛式清选装置上物料的非线性运动规律[J].农业工程学报,2007,23(11):142-147.
LI Yaoming, ZHAO Zhan, CHEN Jin, et al. Nonlinear motion law of material on air-and-screen cleaning mechanism[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(11): 142-147. (in Chinese)

[6] 刘初升,陆金新.筛分过程中颗粒运动的非线性特性研究[J].煤炭学报,2009,34(4):556-559.
LIU Chusheng, LU Jinxin. Study on nonlinear characteristic of particle motion during the process of coal screening[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(4): 556-559. (in Chinese)

[7] 原建博,吴崇友,李骅,等.水稻收获脱出物风机-内圆筒筛分运动研究[J].南京工业大学学报(自然科学版),2019,

- 41(3):361–369.
- YUAN Jianbo, WU Chongyou, LI Hua, et al. Screening motion of a fan-inner cylinder sieve for rice harvest exfoliants[J]. Journal of Nanjing University of Technology (Natural Science Edition), 2019, 41(3):361–369. (in Chinese)
- [8] YIN Zhongjun, ZHANG Hang, HAN Tian. Simulation of particle flow on an elliptical vibrating screen using the discrete element method[J]. Powder Technology, 2016, 302: 443–454.
- [9] JIANG Haishen, ZHAO Yuemin, DUAN Chenlong, et al. Kinematics of variable-amplitude screen and analysis of particle behavior during the process of coal screening[J]. Powder Technology, 2017, 306: 88–95.
- [10] 王立军, 崔友强, 郑招辉, 等. 振动筛不同运动形式对颗粒群筛分的影响[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 119–129.
- WANG Lijun, CUI Youqiang, ZHENG Zhaohui, et al. Effect of different motion forms of vibrating screen on screening of particle group[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 119–129. (in Chinese)
- [11] REN Luquan. Progress in the bionic study on anti-adhesion and resistance reduction of terrain machines[J]. Science in China Series E: Technological Sciences, 2009, 52(2): 273–284.
- [12] MA Zheng, LI Yaoming, XU Lizhang. Theoretical analysis of micro-vibration between a high moisture content rape stalk and a non-smooth surface of a reciprocating metal cleaning screen matrix[J]. Biosystems Engineering, 2015, 129: 258–267.
- [13] 程超, 付君, 陈志, 等. 水稻收获机涂层改性清选筛面设计与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(2): 94–102.
- CHENG Chao, FU Jun, CHEN Zhi, et al. Design and experiment on modified sieve with coating of rice harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(2): 94–102. (in Chinese)
- [14] WANG Lijun, YU Yongtao, ZHANG Shuai, et al. Bionic design and performance test of maize grain cleaning screen through earthworm motion characteristics[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2021, 14(3): 12–21.
- [15] 王万章, 刘婉茹, 袁玲合, 等. 小麦植株建模与单纵轴流物料运动仿真与试验[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊2): 170–180.
- WANG Wanzhang, LIU Wanru, YUAN Linghe, et al. Simulation and experiment of single longitudinal axial material movement and establishment of wheat plants model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 2): 170–180. (in Chinese)
- [16] 李洪昌, 李耀明, 唐忠, 等. 风筛式清选装置振动筛上物料运动 CFD-DEM 数值模拟[J]. 农业机械学报, 2012, 43(2): 79–84.
- LI Hongchang, LI Yaoming, TANG Zhong, et al. Numerical simulation of material motion on vibrating screen of air-and-screen cleaning device based on CFD-DEM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(2): 79–84. (in Chinese)
- [17] 周文秀. 玉米籽粒的物理力学特性研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- ZHOU Wenxiu. The physical and mechanical properties research of corn grain[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [18] 王立军, 武振超, 冯鑫, 等. 玉米收获机清选曲面筛设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(2): 90–101.
- WANG Lijun, WU Zhenchao, FENG Xin, et al. Design and experiment of curved screen for maize grain harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(2): 90–101. (in Chinese)
- [19] 张荣芳, 焦伟, 周纪磊, 等. 不同填充颗粒半径水稻种子离散元模型参数标定[J]. 农业机械学报, 2020, 51(增刊1): 227–235.
- ZHANG Rongfang, JIAO Wei, ZHOU Jilei, et al. Parameter calibration and experiment of rice seeds discrete element model with different filling particle radius[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(Supp. 1): 227–235. (in Chinese)
- [20] WANG Lijun, LI Rui, WU Baoxin, et al. Determination of the coefficient of rolling friction of an irregularly shaped maize particle group using physical experiment and simulations[J]. Particuology, 2018, 38(6): 185–195.
- [21] WANG Lijun, ZHOU Wenxiu, DING Zhenjun, et al. Experimental determination of parameter effects on the coefficient of restitution of differently shaped maize in three-dimensions[J]. Powder Technology, 2015, 284: 187–194.
- [22] 王立军, 冯鑫, 武振超, 等. 玉米联合收获机贯流风阶梯式振动筛设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(10): 115–123.
- WANG Lijun, FENG Xin, WU Zhenchao, et al. Design and test of stepped vibrating screen with cross air for maize harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(10): 115–123. (in Chinese)
- [23] 徐立章, 李洋, 李耀明, 等. 谷物联合收获机清选技术与装置研究进展[J]. 农业机械学报, 2019, 50(10): 1–16.
- XU Lizhang, LI Yang, LI Yaoming, et al. Research progress on cleaning technology and device of grain combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(10): 1–16. (in Chinese)
- [24] GB/T 21962—2020 玉米收获机械[S]. 2020.
- [25] NY/T 1355—2007 玉米收获机作业质量[S]. 2007.